



## Efeito do dióxido de carbono e da radiação solar na biomassa algal produzida em fotobiorreator laminar

doi:10.4136/ambi-agua.1877

Received: 01 Mar. 2016; Accepted: 14 May 2016

Tiago Borges Ferreira<sup>1\*</sup>; Jesús Fernández González<sup>2</sup>;  
André Luís Teixeira Fernandes<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP, Brasil  
Departamento de Hidráulica e Saneamento

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, España  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos

<sup>3</sup>Universidade de Uberaba (UNIUBE), Uberaba, MG, Brasil

\*Autor correspondente: e-mail: tiago\_bferreira@hotmail.com,  
j.fernandez@upm.es, andre.fernandes@uniube.br

### RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo mensurar a influência do fornecimento artificial de CO<sub>2</sub> e da variação da radiação fotossinteticamente ativa na biomassa algal em um fotobiorreator laminar. Utilizou-se para tanto, avaliações de produção e concentração de nitrogênio e fósforo na biomassa coletada semanalmente em cada uma das 36 subdivisões do sistema. Além disso, se determinou, por meio de cálculos baseados na produtividade, os intervalos de eficiências produtiva e energética. O fornecimento artificial de CO<sub>2</sub> influenciou a produção de biomassa, incrementando a produtividade de 3,9 a 27,0%. A radiação fotossinteticamente ativa manteve estreita relação com a produção de biomassa, com variação de até 60,5%, produzindo entre 1,42 e 2,28 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. A concentração de nitrogênio na biomassa não foi influenciada por nenhum dos fatores avaliados, porém o fósforo sofreu influência de ambos os fatores. As eficiências produtiva e energética tiveram as mesmas influências, variando de 0,28 a 0,44 g mol<sup>-1</sup> e 2,12 a 3,34%, respectivamente.

**Palavras chave:** *Chlorella*, eficiência energética, microalgas.

### Effect of carbon dioxide and sunlight on algae biomass produced in laminar photobioreactor

### ABSTRACT

This work measured the influence of CO<sub>2</sub> supply and photosynthetically active radiation on microalgae production in the laminar photobioreactor. In order to accomplish this, the production and concentration of nitrogen and phosphorus in the biomass collected from each of the 36 subdivisions of the system was analyzed weekly. Additionally, productive and energetic efficiencies were determined by estimating biomass production. The artificial CO<sub>2</sub> supply affected biomass production, increasing the productivity from 3.9 to 27.0%. The photosynthetically active radiation was related to the production of biomass, which varied up to 60.5%, producing between 1.42 and 2.28 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. The nitrogen concentration in the

biomass was not influenced by any of the evaluated factors; nevertheless, the phosphorus was influenced by both factors. The productive and energetic efficiencies had similar influence, ranging from 0.28 to 0.44 g mol<sup>-1</sup> and from 2.12 to 3.34%, respectively.

**Keywords:** *Chlorella*, energetic efficiency, microalgae.

## 1. INTRODUÇÃO

As microalgas são consideradas como a origem dos fitoplanctons marinhos e dos vegetais superiores, que em conjunto são responsáveis pela presença de oxigênio na atmosfera. Porém, sua primeira utilização pelos seres humanos foi somente há 2000 anos, quando a espécie *Nostoc* sp. foi utilizada como alimento na China (Priyadarshani e Rath, 2012).

Atualmente, o cultivo de microalgas tem ganhado destaque, principalmente por apresentar diversas vantagens econômicas e ambientais frente a outros cultivos, dentre as quais se destacam: potencial para produzir mais biocombustível que qualquer outra fonte oleaginosa (Chen et al., 2009); não compete com a agricultura tradicional, por ser geralmente cultivada em fotobiorreatores, utilizando áreas não agricultáveis (Chen et al., 2009; Soares et al., 2011); pode-se cultivar em diversos climas e condições hídricas, além de utilizar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de diversas fontes (Chen et al., 2009; Priyadarshani e Rath, 2012).

Sua composição permite a extração de ampla gama de produtos, incluindo fármacos, cosméticos, vitaminas, minerais, óleos essenciais, proteína e substâncias bioativas, os quais são destinados principalmente para a produção de alimentos, rações animais e biofertilizantes (Benemann, 2006; Borghetti, 2009; Chen et al., 2009; Mata et al., 2010).

Cultivadas inicialmente somente em reatores abertos, alcançavam baixas produções e não se possibilitava o controle das condições de cultivo. Por estas limitações, estimulou-se o desenvolvimento dos modernos sistemas, subdivididos em dois grandes grupos; fechados e híbridos, que garantiram maior controle do cultivo e a intensificação da produção. O sistema em questão é um híbrido, patenteado pela Universidade Politécnica de Madri como fotobiorreator laminar (do inglês-PBRL) sob o n° EP2568038 A1 (Fernández, 2011). O modelo é constituído de duas placas de geotêxtil verticais, formando uma câmara vazia em seu interior, na qual se introduz o fornecimento artificial de CO<sub>2</sub>, e seu exterior permanece em contato direto com o ar atmosférico, sendo nutrido por uma corrente fechada de meio de cultivo. O PBRL pode ser considerado um sistema recente e pouco popularizado, porém com elevado potencial produtivo e grande capacidade de mitigação de produções industriais de CO<sub>2</sub>, além de possuir colheita com elevada concentração de matéria seca, ponto crítico para alguns autores (Mata et al., 2010; Linares et al., 2012).

O desenvolvimento de novas configurações de fotobiorreatores tem por objetivo a maximização da produção de biomassa, assim como atender alguma especificidade do fim que será empregada a produção, como pode ser o caso da composição lipídica, para aplicação na produção de biocombustíveis, ou nutricional, quando empregado na alimentação animal ou fertilização de solo.

Assim como o desenvolvimento de novas configurações, alguns parâmetros de controle do cultivo se tornam fatores determinantes para esse avanço, sendo que a disponibilidade de fonte inorgânica de carbono e intensidade da radiação recebida se mostram como alguns dos principais (Borghetti, 2009; Soares et al., 2011).

Partindo destes preceitos, esse trabalho teve como objetivo verificar a influência do fornecimento artificial de CO<sub>2</sub> e da variação da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) na biomassa algal produzida no PBRL, avaliando a produtividade, eficiência energética e conteúdo de Nitrogênio e Fósforo.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido nas instalações do Grupo de Agroenergética, integrado ao Departamento de Produção Vegetal: Botânica e Proteção Vegetal da Escola Técnica Superior de Engenheiros Agrônomos da Universidade Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, Espanha.

A instalação utilizada foi a estufa de cultivo de microalgas, onde se encontra instalado o fotobiorreator laminar (PBRL) de cultura mista (gêneros *Chlorella* e *Scenedesmus*) patenteado pelo pesquisador Dr. Jesús Fernández sob a tutela da UPM (Fernández, 2011).

### 2.1. Dados ambientais

A estufa de cultivo possuía sistemas automatizados de mensuração da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) solar, temperatura e concentração de CO<sub>2</sub>, com funcionamento contínuo durante as 24 horas do dia.

### 2.2. Meio de cultivo

A solução nutritiva possuía valores de pH iguais a 6,5 e composição química de 200, 87,3 e 166 mg L<sup>-1</sup> de nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente, além de boro (0,068), cobre (0,036), ferro (0,5), magnésio (0,25), molibdênio (0,009) e zinco (0,025 mg L<sup>-1</sup>). A solução nutritiva foi submetida a monitoramento de macronutrientes duas vezes por semana, com análises de nitrogênio orgânico e amoniacal pelo método Kjeldhal, nitrogênio nítrico por redução prévia a nitrogênio amoniacal com liga de Devarda seguido do método Kjeldhal, fósforo por método colorimétrico de vanadato-molibdato e potássio por fotometria de chama (APHA et al., 2012).

### 2.3. Desenho experimental

A pesquisa foi realizada em dois módulos centrais do PBRL, os quais foram estratificados segundo critérios específicos a cada parâmetro analisado, CO<sub>2</sub> e RFA:

- CO<sub>2</sub>: para avaliar a influência do seu fornecimento, interrompeu-se o abastecimento de um dos módulos, mantendo-o sem adição artificial de CO<sub>2</sub>, exposto somente a concentração atmosférica (0,033% volume/volume – v/v), além de manter o outro módulo com fornecimento artificial médio de 0,38% (v/v) de CO<sub>2</sub> no interior da câmara formada entre os dois painéis.

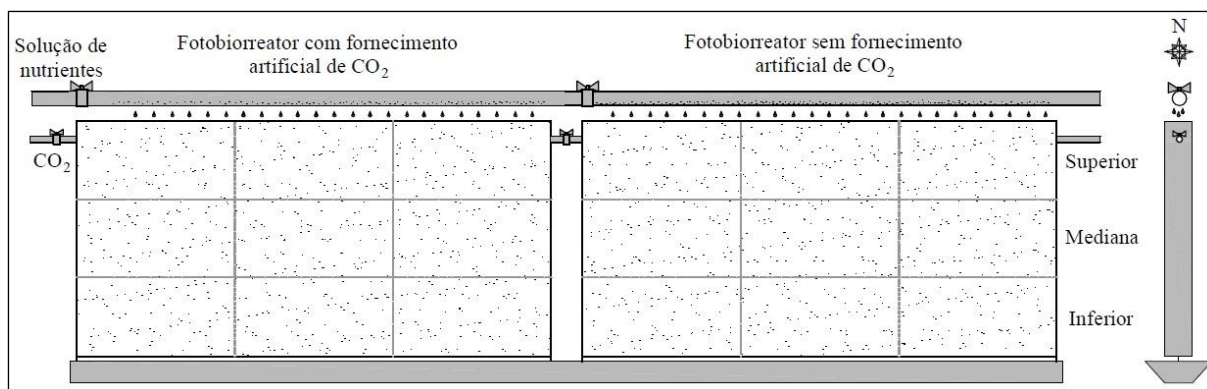
- RFA: por haver diferença na intensidade da radiação solar recebida segundo altura e orientação, a mensuração dos valores de RFA foi realizada a partir dos dados dos sensores instalados em suportes independentes, paralelos ao PBRL, sendo três em cada orientação (oeste e leste), justificando assim a divisão da superfície do painel em três faixas (superior, mediana, inferior). Para definir os períodos fotoquímicos (luminoso) e químicos (escuro) em todos os índices (temperatura, fornecimento de CO<sub>2</sub> e RFA), foi adotado o valor de RFA de 15 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>.

Para melhorar o tratamento estatístico, foram realizadas três subdivisões por faixa, perfazendo um total de nove blocos por superfície e, conseqüentemente, 18 por painel (Figura 1).

Os fotobiorreatores já se encontravam em funcionamento no início do experimento, sendo que estes haviam sido inoculados inicialmente com espécies dos gêneros *Chlorella* e *Scenedesmus*, com composição aproximada de 80 e 20%, respectivamente, no momento do experimento.

A coleta e o tratamento da biomassa algal foram realizados manualmente, com intervalos semanais durante as quatro semanas de estudo.

A produtividade foi avaliada em produções de biomassa algal em matéria seca por unidade de área do fotobiorreator e dia (g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>).



**Figura 1.** Esquema representativo do desenho experimental.

As análises de Nitrogênio orgânico e Fósforo total em biomassa seca foram realizadas pelo método Kjeldahl em biomassa finamente triturada e colorimétrico vanadato-molibdato nas cinzas da biomassa produzida.

Como é sabido, a energia proporcionada por cada mol de fótons no intervalo de radiação visível e aproveitável na reação fotossintética (400 a 700 nm) é de 40,8 - 70,5 kcal, sendo que para determinação da eficiência energética do consórcio microalgal foi utilizado o valor médio; 55,65 kcal mol<sup>-1</sup>.

Segundo análises realizadas pelo Grupo de Agroenergética da UPM, a biomassa algal produzida nas condições descritas possui cerca de 4.200 kcal kg<sup>-1</sup>.

As eficiências produtivas e energéticas da atividade fotossintética das microalgas foram calculadas segundo as seguintes equações:

$$\text{Eficiência produtiva (g mol}^{-1}\text{)} = \left[ \frac{\text{Produtividade (g m}^{-2}\text{d}^{-1}\text{)}}{\text{Energia recebida (mol m}^{-2}\text{d}^{-1}\text{)}} \right]$$

$$\text{Eficiência energética (\%)} = \left[ \frac{\text{Eficiência produtiva (g mol}^{-1}\text{)} \times 4,2 \text{ (kcal g}^{-1}\text{)}}{55,65 \text{ kcal mol}^{-1}} \right] \times 100$$

O processamento dos dados foi realizado por meio de análises estatística (ANOVA - análise de variância para  $p < 0,05$ ) e gráfica.

Vale ressaltar que o trabalho teve discussões baseadas, em sua maioria, em cultivos puros em soluções aquosas, pois, como citado anteriormente, o PBRL se trata de um sistema recente e pouco relatado cientificamente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Dados de condições ambientais

O monitoramento das temperaturas do ambiente e do reservatório de solução nutritiva foi realizado para garantir a manutenção das condições ambientais durante o período experimental, que proporcionaram as condições necessárias ao desenvolvimento microalgal.

Não houve grandes variações da temperatura da solução nutritiva, permanecendo entre 21,72 e 26,45°C na fase fotoquímica. Essa faixa de temperatura atende à temperatura tida como ideal para cultivos nestas condições, pois, segundo Chen et al. (2009), as espécies mais comuns de algas se desenvolvem entre 16 e 27°C.

Os valores médios de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) variaram entre 92,9 -

173,4 e 121,1 – 191,4  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para orientação oeste e leste, respectivamente. Em relação ao fornecimento de  $\text{CO}_2$ , a concentração deste gás, fornecido artificialmente no interior do PBRL foi, em média, de 0,38% (v/v), diferentemente do outro módulo que dispunha somente do  $\text{CO}_2$  ambiente, para o qual se registrou 0,033% (v/v).

### 3.2. Produção de biomassa

Influência do dióxido de carbono -  $\text{CO}_2$

As produções de biomassa algal foram agrupadas em valores médios, segundo a altura, a orientação e a presença de  $\text{CO}_2$  (Tabela 1).

**Tabela 1.** Produtividade expressa em matéria seca ( $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) referente ao fornecimento de  $\text{CO}_2$ , considerando radiação fotossinteticamente ativa e temperatura.

Semana	Temperatura média do meio cultivo (°C)	Altura	RFA ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )		Com incremento de $\text{CO}_2$ ( $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )		Sem incremento de $\text{CO}_2$ ( $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )	
			Leste	Oeste	Leste	Oeste	Leste	Oeste
1°	21,72	Superior	136,99	177,27	2,04	2,33	1,80	2,18
		Mediana	92,83	118,63	1,83	1,67	1,52	1,85
		Inferior	70,14	101,57	1,39	1,27	0,87	1,43
2°	24,51	Superior	176,01	209,88	2,45	1,82	2,12	1,85
		Mediana	130,00	141,83	1,73	1,42	1,40	1,20
		Inferior	93,10	122,38	1,65	1,35	1,49	1,25
3°	24,81	Superior	187,21	190,36	2,91	2,46	1,95	2,20
		Mediana	147,17	139,67	2,03	1,93	1,69	1,65
		Inferior	103,49	122,88	1,71	1,75	1,55	1,45
4°	26,43	Superior	195,28	187,89	1,73	1,19	1,32	1,27
		Mediana	156,39	148,81	1,08	1,17	0,90	0,91
		Inferior	104,93	137,57	0,96	1,33	1,00	0,91
Média total	24,37	Superior	173,87	191,35	2,28	1,95	1,80	1,88
		Mediana	131,60	137,24	1,67	1,55	1,38	1,40
		Inferior	92,92	121,10	1,43	1,42	1,23	1,26

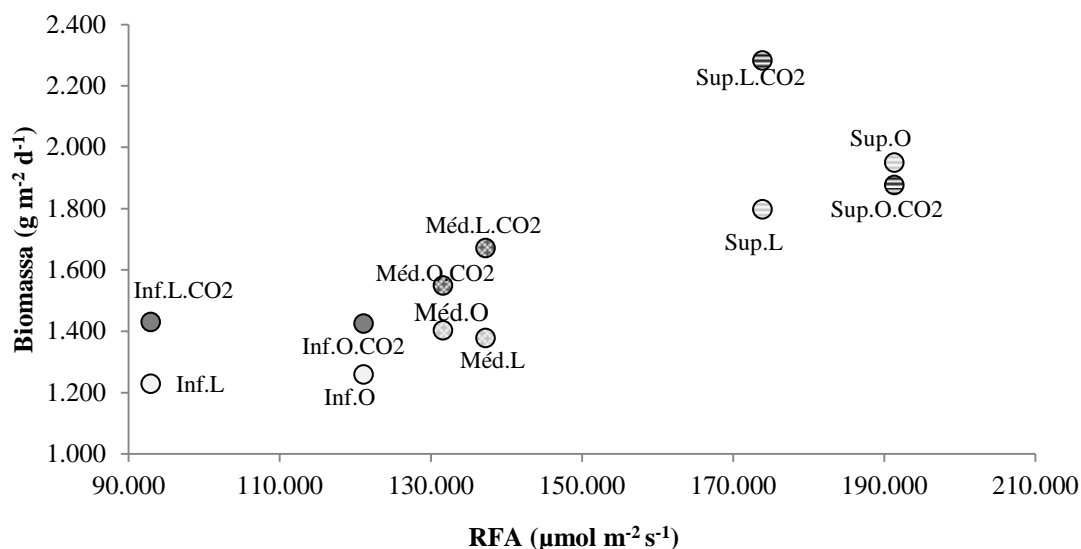
Baseado na Tabela 2 pode-se afirmar que as quantidades de biomassa algal coletadas nos distintos painéis possuem diferença estatística expressiva ( $p < 0,05$ ), evidenciando a influência do fornecimento artificial de  $\text{CO}_2$  na produtividade.

**Tabela 2.** Análise de variância em relação à produtividade – Soma dos quadrados tipo III.

Fonte	Soma dos quadrados	Gl	Quadrado Médio	Razão-F	Valor-P
Efeitos Principais					
A: Fornecimento de $\text{CO}_2$	1,909	1	1,909	13,76	0,0003
B: Altura	10,9267	2	5,46333	39,39	0,000
C: Orientação	0,00466944	1	0,00466944	0,03	0,8547
Interação					
AB	0,0740722	2	0,0370361	0,27	0,7661
AC	0,2809	1	0,2809	2,03	0,1571
BC	0,0864222	2	0,0432111	0,31	0,7329
ABC	0,14735	2	0,073675	0,53	0,5892
Resíduos	18,3103	132	0,138715		
<b>Total (corrigido)</b>	<b>31,7394</b>	<b>143</b>			

**Nota:** Gl: graus de liberdade.

Nas Tabelas 1 e 2, evidencia-se a influência do fornecimento artificial de CO<sub>2</sub> na produtividade do cultivo (valor- $p < 0,05$ ), além de expressiva influência da radiação (valor- $p$  do fator B  $< 0,05$ ), assim como citam outros trabalhos (Borghetti, 2009; Gonçalves et al., 2014), claramente visíveis na Figura 2 e Tabela 3, a qual mostra o incremento percentual referente ao fornecimento do gás segundo as faixas – superior, mediana e inferior.



**Figura 2.** Produtividade média segundo influência do CO<sub>2</sub> e Radiação.

**Nota:** Inf.L.CO<sub>2</sub>: faixa inferior leste com fornecimento de CO<sub>2</sub>; Inf.O.CO<sub>2</sub>: faixa inferior oeste com fornecimento de CO<sub>2</sub>; Inf.L: faixa inferior leste sem fornecimento de CO<sub>2</sub>; Inf.O: faixa inferior oeste sem fornecimento de CO<sub>2</sub>; Méd.L.CO<sub>2</sub>: faixa mediana leste com fornecimento de CO<sub>2</sub>; Méd.O.CO<sub>2</sub>: faixa mediana oeste com fornecimento de CO<sub>2</sub>; Méd.L: faixa mediana leste sem fornecimento de CO<sub>2</sub>; Méd.O: faixa mediana oeste sem fornecimento de CO<sub>2</sub>; Sup.L.CO<sub>2</sub>: faixa superior leste com fornecimento de CO<sub>2</sub>; Sup.O.CO<sub>2</sub>: faixa superior oeste com fornecimento de CO<sub>2</sub>; Sup.L: faixa superior leste sem fornecimento de CO<sub>2</sub>; Sup.O: faixa superior oeste sem fornecimento de CO<sub>2</sub>.

**Tabela 3.** Incremento percentual da produtividade atribuído ao CO<sub>2</sub> segundo a altura.

Altura	RFA média ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )		Incremento percentual em $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ referente ao CO <sub>2</sub> (%)	
	Leste	Oeste	Leste	Oeste
Superior	173,9	191,4	27,0	3,9
Mediana	131,6	137,2	21,3	10,4
Inferior	92,9	121,1	16,4	13,2

Ainda com base na Figura 2 e na Tabela 1, nota-se a inversão da variação de produção, sendo que no módulo onde se forneceu CO<sub>2</sub>, a produtividade maior foi na orientação leste, justamente o contrário do módulo que não foi submetido ao gás. Todas as faixas do módulo com fornecimento de CO<sub>2</sub> resultaram em produções de biomassa superior, variando entre 3,9 e 27,0% de incremento sobre o módulo sem fornecimento, variações significativas segundo teste-T. Liao et al. (2014) reportaram produção de biomassa 138% maior quando fornecido CO<sub>2</sub> em concentração de 10% (v/v) em cultivo de *Chlorella pyrenoidosa*. O fato do incremento inferior a literatura se deu pelas diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> utilizadas, como



Yue e Chen (2005) que relataram máxima produção em concentrações de CO<sub>2</sub> de 10% (v/v), assim como Min et al. (2012), que citaram sua máxima produtividade em concentrações de 5%. O trabalho em questão teve fornecimento médio de 0,38% (v/v), porém, vale ressaltar que, diferente da literatura citada, o trabalho se deu em cultura mista com distribuição do gás na parte interna do módulo, onde, segundo Chen et al. (2009), um incremento de concentração de CO<sub>2</sub> superior a 5% seria tóxico a certas espécies de microalgas.

### Fatores que influenciam a Radiação Fotossinteticamente Ativa:

#### Orientação

Ao analisar a RFA média recebida por superfície (Tabela 3), notam-se diferenças na quantidade de RFA disponível, causada pela orientação, com uma maior radiação na superfície orientada a oeste. Porém, ao relacionar esta informação aos dados de produção, não se pode afirmar a relação orientação-produção (Tabela 2), porque estatisticamente não é um fator condicionante (valor- $p > 0,05$ ).

#### Altura

Baseando-se na análise estatística (Tabela 2), pode-se comprovar uma explícita influência da altura na produtividade (valor- $p < 0,05$ ), relação esta também apreciável na Figura 1.

Na Tabela 4 constam os valores dos incrementos percentuais, calculados com base na faixa inferior do painel – parte menos favorecida pela radiação – seguindo gradiente crescente e ascendente no sentido vertical.

**Tabela 4.** Incremento percentual da produtividade e radiação, seguindo de sentido vertical com referência na faixa inferior.

Altura	RFA (%)		Produção com incremento de CO <sub>2</sub> (%)		Produção sem incremento de CO <sub>2</sub> (%)		Média da produção (%)		
	Leste	Oeste	Leste	Oeste	Leste	Oeste	Leste	Oeste	Total
Superior	87,84	59,38	61,18	37,16	51,69	48,26	56,44	42,71	<b>49,57</b>
Mediana	40,81	13,63	16,94	8,88	16,92	9,86	16,93	9,37	<b>13,15</b>
Inferior	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>

Ao analisar as Tabelas 2 e 4, fica evidente a relação direta entre esses dois fatores (produção e radiação), caracterizando o gradiente descrito anteriormente que se inicia na parte inferior (menor disponibilidade de radiação), encontrando-se o mesmo comportamento na produção de biomassa, assim como relatam Gonçalves et al. (2014) em experimento com variação controlada da radiação em culturas puras.

Esse aumento da RFA provocou o aumento da atividade fotossintética, atingindo o máximo de saturação de luz e, conseqüentemente, máxima produtividade. Uma vez atingido esse índice, ocorreu saturação do sistema receptor e a produção não manteve essa relação com a RFA (Tabela 4), sofrendo declínio com o contínuo aumento da intensidade do fluxo de fótons recebidos, fato notável na Tabela 1 (valor de máxima produtividade não coincide com a máxima radiação justamente por esta haver ultrapassado o ponto de saturação máxima), provocado pela excessiva geração de oxigênio via foto-ativação, gasto energético com a dissipação deste excesso de radiação e danos no sistema fotossintético, fenômeno conhecido como fotoinibição (Benemann, 2006; Borges et al., 2007; Seo et al., 2014).

Chang et al. (2016) avaliando o cultivo de *Chlorella vulgaris*, em cultivo em suspensão obtiveram seu ponto de saturação máxima em intensidade de  $120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , valor semelhante aos  $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  verificados por Liu et al. (2013) ao avaliar o ponto de saturação máxima de um cultivo de *Scenedesmus obliquus* em fotobiorreator vertical. Apesar da impossibilidade de se determinar o exato ponto de saturação máximo deste estudo, possivelmente se encontra entre  $173$  e  $191 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , intervalo que ficou clara a fotoinibição.

Com base nos dados de produtividade descritos na Tabela 1, foi calculada a influência da variação da RFA, com a diferença entre a faixa de menor e maior recepção de radiação, chegando a valores de 60,5 e 52,8% nos módulos com fornecimento de  $\text{CO}_2$  e sem fornecimento, respectivamente. Essa maior influência da RFA no módulo com fornecimento de  $\text{CO}_2$  é justificado pela influência deste na produção, a qual já foi discutida anteriormente. Borghetti (2009) e Gonçalves et al. (2014) descrevem essas influências ao afirmar que o crescimento de microalgas está diretamente relacionado com a taxa de fixação de  $\text{CO}_2$  e utilização de energia luminosa.

Min et al. (2012), avaliando a influência destes mesmos parâmetros em cultura pura e solução aquosa, também relatam essa interação, obtendo seu melhor rendimento em RFA de  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e 5% de  $\text{CO}_2$ . Os autores observam não haver influência da radiação em ausência do fornecimento de  $\text{CO}_2$ , a qual foi verificada nesse estudo, pois assim como supracitado, houve em média variação da produtividade de 52,8% no PBRL sem fornecimento artificial de  $\text{CO}_2$ . Este fato é justificado por se tratar de cultura mista, diferentemente do trabalho citado, além de ter sido desenvolvido em fotobiorreator que possibilita melhor assimilação do  $\text{CO}_2$  do ambiente, onde houve em média 0,033% de  $\text{CO}_2$ .

### 3.3. Concentração de nutrientes: Nitrogênio e Fósforo

As concentrações médias de nutrientes, expressas em percentagem do elemento por unidade de massa da biomassa algal, estão dispostas na Tabela 5.

**Tabela 5.** Conteúdo médio de nitrogênio e fósforo na biomassa algal em função da altura, orientação e fornecimento artificial de  $\text{CO}_2$ . Valores expressos em % sobre peso seco de biomassa.

Altura		Com incremento de $\text{CO}_2$			Sem incremento de $\text{CO}_2$		
		Leste	Oeste	Média	Leste	Oeste	Média
Superior	%N	7,369	7,604	7,487	7,530	7,458	7,494
	%P	0,844	0,883	0,864	0,850	0,977	0,914
Mediana	%N	7,700	7,821	7,760	7,750	7,548	7,649
	%P	0,943	0,827	0,885	0,783	0,852	0,818
Inferior	%N	7,692	7,877	7,784	7,727	7,607	7,667
	%P	0,762	0,825	0,794	0,742	0,894	0,818
Média N		7,587	7,767	7,677	7,669	7,538	7,603
Média P		0,850	0,845	0,847	0,792	0,908	0,850

Com base em análise estatística, não houve diferenças significativas entre as concentrações de nitrogênio na biomassa oriunda dos distintos sistemas. Porém, com base na Tabela 6, o conteúdo de fósforo presente na biomassa algal foi evidentemente influenciado pela radiação (RFA), pois o fator orientação resultou em valor  $p < 0,05$ , além do fator altura valor  $p = 0,05$ . Ainda segundo a análise estatística (Tabela 6) o fornecimento de  $\text{CO}_2$  tem



influência sobre a concentração de fósforo somente quando em interação com a orientação (radiação).

**Tabela 6.** Análise de variância referente a concentração de P.

Fontes	Soma dos Quadrados	Gl	Quadrados Médios	Razão-F	Valor-P
<b>Efeitos Principais</b>					
A: Fornecimento de CO <sub>2</sub>	8,64648E-05	1	8,64648E-05	0,01	0,9224
B: Altura	0,0571021	2	0,0285511	3,17	0,0537
C: Orientação	0,0381464	1	0,0381464	4,24	0,0467
<b>Interação</b>					
AB	0,0301453	2	0,0150727	1,68	0,2014
AC	0,0441108	1	0,0441108	4,91	0,0332
BC	0,0377203	2	0,0188602	2,1	0,1375
ABC	0,00584734	2	0,00292367	0,33	0,7245
Resíduos	0,323729	36	0,00899247		
<b>Total (corrigido)</b>	<b>0,536888</b>	<b>47</b>			

É sabido que o incremento da radiação favorece a fosforilação fotossintética cíclica no fotossistema I, o que conduz a formação de ATP a partir de ADP e fosfato retirado do meio nutriente. Uma fração do ATP fotossintético é utilizada na fosforilação do NAD<sup>+</sup> formando NADP<sup>+</sup> e outra parte na fosforilação dos açúcares utilizados na assimilação do carbono (ciclo de Calvin-Benson). Por outro lado, conforme Tredici (2010), a concentração de fósforo condicionada à radiação e fornecimento artificial de CO<sub>2</sub> é possivelmente pela inter-relação entre a energia captada, seu posterior transporte pela coenzima NADP<sup>+</sup> (nicotinamida adenina dinucleótido fosfato) e subsequente redução do CO<sub>2</sub> no ciclo de Calvin-Benson. A maior disponibilidade de radiação e CO<sub>2</sub> estimula uma maior presença de NADP<sup>+</sup>, o que proporciona maior concentração de fósforo a biomassa submetida a estas condições.

### 3.4. Eficiência do cultivo

Verificou-se variável produção de biomassa por unidade de energia, porém, com comportamento oposto a produção por unidade de área. Torna-se evidente, principalmente ao se analisar os dados médios, que seguiram variação inversa à variação da radiação. Isso é justificável pela teoria da fotoinibição descrita anteriormente, pois se em presença de grande quantidade de fótons os centros fotossintéticos não são capazes de aproveitá-los todos, perdendo eficiência, a recepção de um pequeno fluxo de fótons traz o aproveitamento máximo destes, consequentemente, permitindo máxima eficiência por unidade energética.

Tratando-se unicamente da RFA, os valores médios variaram de 0,29 a 0,44 g mol<sup>-1</sup> para o módulo com fornecimento de CO<sub>2</sub> e 0,28 a 0,38 g mol<sup>-1</sup> para o módulo sem fornecimento de CO<sub>2</sub>.

Quando se isola o fornecimento de CO<sub>2</sub> como único condicionante, chega-se a valores médios de 0,35 e 0,31 g mol<sup>-1</sup> para o módulo que houve fornecimento de CO<sub>2</sub> e sem fornecimento, respectivamente.

A eficiência energética da atividade fotossintética do consórcio microalgal se manteve entre 2,12 e 3,32%, valores estes que se enquadram no intervalo descrito por Stephens et al. (2010) entre 1 e 4%, porém, são sutilmente superiores ao intervalo de 2 a 3% citado pela literatura (Benemann, 2006; Pruvost et al., 2016) para sistemas abertos e externos.

Ozkan et al. (2012) reportaram 2,02% de eficiência fotossintética ao avaliarem *Botryococcus braunii* em fotobiorreator de cultivo imobilizado em biofilme. Ao avaliar a eficiência fotossintética de *Chlorella pyrenoidosa* cultivadas em fotobiorreator tubular, Liao et al. (2014) lograram valores de 1,15 e 2,92 para concentrações de CO<sub>2</sub> de 0,03 e 10%, respectivamente. Valores esses levemente inferiores aos obtidos neste estudo.

## 4. CONCLUSÕES

O fornecimento artificial de CO<sub>2</sub> e a radiação fotossinteticamente ativa, nas condições deste estudo, se mostraram representativamente influente na produção e no percentual de fósforo da biomassa.

O fornecimento de 0,38% de CO<sub>2</sub>, associado à variação de RFA de 92,92 a 191,35  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  aumentou a produtividade em até 60,5% a produção de biomassa.

Consequentemente, as eficiências produtivas e energéticas da atividade fotossintética também se mostraram influenciadas, variando entre 0,28 e 0,44 g mol<sup>-1</sup> e 2,12 a 3,32%, respectivamente.

## 5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela bolsa Ciência sem fronteiras, Processo N. 214762/2012-2, à Universidade de Uberaba e a todos que compõe o Grupo de Agroenergética, em especial ao Professor Dr. Jesús Fernández.

## 6. REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA; WATER ENVIRONMENT FEDERATION - WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22nd edition. Washington, D.C., 2012.724p.
- BENEMANN, J. R. **Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO<sub>2</sub> to biomass**. Pittsburgh: Department of Energy, 2006. 215p.
- BORGES, L.; FARIA, B. M.; ODEBRECHT, C. ABREU, P. C. Potencial de absorção de carbono por espécies de microalgas usadas na aquicultura: Primeiros passos para o desenvolvimento de um “mecanismo de desenvolvimento limpo”. **Atlântica**, v. 29, p. 35-46, 2007.
- BORGHETTI, I. A. **Avaliação do crescimento da microalga *Chlorella minutissima* em meio de cultura com diferentes concentrações de manipuera**. 2009. 103f. Dissertação (Mestrado em Processos Biotecnológicos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- CHANG, H. X.; HUANG, Y.; FU, Q.; LIAO, Q.; ZHU, X. Kinetic characteristics and modeling of microalgae *Chlorella vulgaris* growth and CO<sub>2</sub> biofixation considering the coupled effects of light intensity and dissolved inorganic carbon. **Bioresour. Technology**, v. 206, p. 231-238, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.087>
- CHEN, P.; MIN, M.; CHEN, Y.; WANG, L.; LI, Y.; CHEN, Q. et al. Review of the biological and engineering aspects of algae to fuels approach. **International Journal of Agriculture and Biological Engineering**, v. 2, p. 1-30, 2009.
- FERNÁNDEZ, J. **Laminar photobioreactor for the production of microalgae**. U.S. Patent Application 13/695,709, 7 Abr. 2011.
- GONÇALVES, A. L.; SIMÕES, M.; PIRES, J. C. M. The effect of light supply on microalgal growth, CO<sub>2</sub> uptake and nutrient removal from wastewater. **Energy Conversion and Management**, v. 85, p. 530-536, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.085>

- LIAO, Q.; LI, L.; CHEN, R.; ZHU, X. A novel photobioreactor generating the light/dark cycle to improve microalgae cultivation. **Bioresource Technology**, v.161, p.186-191. 2014. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.119>
- LINARES, L. C. F.; MONTOYA, J. M.; OROPEZA, A. M.; CORONA, J. A. B. Producción de biocombustibles a partir de microalgas. **Ra Ximhai**, v.8, p.101-105. 2012.
- LIU, T.; WANG, J.; HU, Q.; HU, Q.; CHENG, P.; JI, B. et al. Attached cultivation technology of microalgae for efficient biomass feedstock production. **Bioresource Technology**, v. 127, p. 216-222, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.100>
- MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 217-232, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- MIN, M.; HU, B.; ZHOU, W.; LI, Y.; CHEN, P.; RUAN, R. Mutual influence of light and CO<sub>2</sub> on carbon sequestration via cultivating mixotrophic alga *Auxenochlorella protothecoides* UMN280 in an organic carbon-rich wastewater. **Journal of Applied Phycology**, v. 24, p. 1099–1105, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-011-9739-3>
- OZKAN, A.; KINNEY, K.; KATZ, L.; BERBEROGLU, H. Reduction of water and energy requirement of algae cultivation using an algae biofilm photobioreactor. **Bioresource Technology**, v. 114, p. 542–548, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.055>
- PRIYADARSHANI, I.; RATH, B. Commercial and industrial applications of micro algae – A review. **Journal of Algal Biomass Utilization**, v. 3, p. 89-100, 2012.
- PRUVOST, J.; LE GOUIC, B.; LEPINE, O.; LEGRAND, J.; LE BORGNE, F. Microalgae culture in buildind-integrated photobioreactors: Biomass production modeling and energetic analysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 284, p. 850-861, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.118>
- SEO, Y. H.; CHO, C.; LEE, J. Y.; HAN, J. I. Enhancement of growth and lipid production from microalgae using fluorescent paint under the solar radiation. **Bioresource Technology**, v. 173, p. 193-197, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.012>
- SOARES, A. H.; TORBEY, B. I.; PASSOS, F. B.; MONTEIRO, L. P. C. Técnicas de crescimento da microalga *Dunaliella salina* para produção de biodiesel e separação de óleo e biomassa produzido no processo. **Engevista**, v. 13, p. 102-110, 2011.
- STEPHENS, E.; ROSS, I. L.; MUSSGUG, J. H.; WAGNER, L. D.; BOROWITZKA, M. A.; POSTEN, C. et al. Future prospects of microalgal biofuel production systems. **Trends in Plant Science**, v. 15, p. 554-564, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2010.06.003>
- TREDICI, M. R. Photobiology of microalgae mass cultures: understanding the tools for the next green revolution. **Biofuels**, v. 1, p. 143-162, 2010. <http://dx.doi.org/10.4155/bfs.09.10>
- YUE, L.; CHEN, W. Isolation and determination of cultural characteristics of a new highly CO<sub>2</sub> tolerant fresh water microalgae. **Energy Conversion and Management**, v. 46, p. 1868-1876, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2004.10.010>